

Perilaku oksidasi dari lapisan komposit Al-MoSi₂ yang difabrikasi di atas baja karbon rendah dengan teknik paduan mekanik

Moh. Thoyful Gufron^{a,*}, Yuris Setyoadi^a, Agus S. Wismogroho^b, Didik Aryanto^b
^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang

Jl. Sidodadi Timur No. 24 - Dr Cipto, Semarang, Indonesia

^bPusat Riset Material Maju, Badan Riset dan Inovasi Nasional

KST BJ. Habibie, Tangerang Selatan 15214, Banten, Indonesia

*E-mail: thoyfulgufron@gmail.com

Abstract

An Al-MoSi₂ composite layer has been deposited on the surface of low carbon steel. The Al-MoSi₂ composite layer was tested for cyclic oxidation for 100 hours in an air environment. Each cycle, the composite layer is in the muffle furnace for 20 hours. The effect of temperature in the cyclic oxidation test on the oxidation behavior of the composite layer was studied based on the relationship of weight gain to cyclicity and oxidation rate. The results of the cyclic oxidation test show that the Al-MoSi₂ composite layer can minimize the occurrence of oxidation on low carbon steel at temperatures of 600 and 700 °C. However, this does not apply to cyclic oxidation at a temperature of 800 °C, where cracks and damage to the layer occur. Al-MoSi₂ coating. This means that the Al-MoSi₂ composite layer has good oxidation resistance at temperatures of 600 and 700 °C.

Kata kunci: Low carbon steel; composite layer; Al-MoSi₂; Cyclic oxidation

Abstrak

Lapisan komposit Al-MoSi₂ telah dideposisikan di atas permukaan baja karbon rendah. Lapisan komposit Al-MoSi₂ di uji oksidasi siklik selama 100 jam dengan lingkungan udara. Setiap siklik, lapisan komposit berada dalam tungku *muffle* selama 20 jam. Efek suhu pada uji oksidasi siklik terhadap perilaku oksidasi dari lapisan komposit dipelajari berdasarkan hubungan pertambahan berat terhadap siklik dan laju oksidasi. Hasil uji oksidasi siklik menunjukkan bahwa lapisan komposit Al-MoSi₂ dapat meminimalisir terjadinya oksidasi pada baja karbon rendah pada suhu 600 dan 700 °C. Namun, Hal tersebut tidak berlaku ketika oksidasi siklik pada suhu 800 °C, dimana terjadi retakan dan kerusakan pada lapisan *coating* Al-MoSi. Hal tersebut berarti bahwa lapisan komposit Al-MoSi₂ memiliki ketahanan oksidasi yang baik pada suhu 600 dan 700 °C.

Kata kunci: Baja karbon rendah, lapisan komposit, Al-MoSi₂, Oksidasi siklik

1. Pendahuluan

Di dunia industri manufaktur, baja karbon rendah banyak digunakan sebagai material struktur karena biayanya yang rendah, sifat mekanik yang baik, dan koefisien muai panas yang rendah dengan relativitas dan biaya yang lebih rendah dibandingkan baja tahan karat [1–4]. Namun, pemanfaatan baja karbon rendah untuk pengaplikasian suhu tinggi masih sangat terbatas karena buruknya ketahanan terhadap keausan, korosi dan oksidasi [1]. Buruknya ketahanan oksidasi baja karbon rendah disebabkan tidak adanya lapisan yang melindungi permukaan [2]. Oleh karena itu, berbagai teknik modifikasi pelapisan permukaan (*coating*) telah dilakukan untuk meningkatkan kualitas ketahanan permukaan material terhadap korosi dan oksidasi [5]. Pelapisan adalah metode yang efektif untuk meningkatkan ketahanan oksidasi suhu tinggi [6]. Lapisan *coating* berfungsi sebagai pelindung terhadap difusi oksigen dan garam korosif pada substrat. Lapisan *coating* harus tetap kontinu dan melindungi substrat dari degradasi yang cepat [1].

MoSi₂ telah secara luas dianggap sebagai salah satu kandidat bahan pelapis ketahanan oksidasi yang paling baik karena ketahanan oksidasinya yang ditingkatkan pada suhu tinggi dengan titik leleh tinggi (2030 °C) [7–11]. Ketahanan oksidasi yang baik diperoleh dengan pembentukan SiO yang tipis, koheren, dan melekat, lapisan MoSi₂ dapat menahan difusi oksigen ke substrat selama oksidasi [7,12]. Pelapis MoSi₂ menciptakan kombinasi luar biasa untuk banyak diaplikasikan pada suhu tinggi [13]. Dengan koefisien ekspansi termal, dan sifat memperbaiki diri yang unggul pada suhu tinggi. MoSi₂ memberikan ketahanan oksidasi suhu tinggi terbaik [14].

Pemilihan bahan pelapis secara langsung mempengaruhi efek perlindungan lapisan pada substrat, peran Al pada proses paduan mekanik ini dapat berfungsi sebagai bahan pengikat pada lapisan, dan diharapkan bermanfaat dalam mengurangi tegangan termal sisa setelah sintering dan pendinginan, serta meningkatkan ketahanan guncangan termal dan ketahanan oksidasi [1,15]. Karena aluminium dapat membentuk lapisan oksida padat pada permukaan yang dapat mengisolasi media korosif ke dalam lapisan, sehingga berperan sebagai anti korosi [13]. Namun, aluminium murni

memiliki kekuatan yang lebih rendah dan ketahanan aus yang buruk, terutama di atas 600 °C [16,17]. Itulah salah satu keterbatasan penggunaan Al yang diaplikasikan pada pelapisan adalah stabilitas kimia dan ketahanan aus menjadi lebih buruk selama kondisi siklus termal (terutama pada suhu tinggi) [18].

Paduan mekanis adalah teknik pencampuran menggunakan metode reaksi padatan (*solid state reaction*) dari beberapa logam (*alloy*) dengan memanfaatkan proses deformasi untuk membentuk suatu paduan [19,20]. Paduan mekanis mampu mengembangkan paduan dengan struktur mikro yang disesuaikan dan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan proses konvensional lainnya. Teknik *ball milling* dapat memperkecil ukuran butir hingga skala nanometer, melakukan transformasi fasa, dan menstabilkan fasa [20,21]. Teknik paduan mekanis banyak digunakan untuk menciptakan lapisan dengan daya rekat tinggi dengan struktur multikomponen pada berbagai permukaan logam [3]. Metode paduan mekanis (*Mechanical Alloying*) memiliki keuntungan besar dalam preparasi pelapisan. Pertama, metode ini membutuhkan waktu lebih sedikit, mengkonsumsi lebih sedikit energi dan biaya lebih sedikit. Kedua, pelapisan dengan komposisi dan struktur kimia yang dibutuhkan dapat diperoleh dengan mudah. Yang sangat meningkatkan kelayakan dan kemampuan adaptasi paduan mekanis dalam persiapan pelapisan [22]. Selain itu, lapisan yang dibuat menggunakan metode Paduan mekanis menunjukkan sifat ikatan metalurgi yang menguntungkan pada parameter penggilingan yang sesuai yang mencakup durasi penggilingan, rasio berat bubuk dan rasio berat bola terhadap bubuk [23].

Karena sudah banyak penelitian yang telah dilakukan untuk menilai sifat-sifat MoSi_2 , Al maupun paduan keduanya. [15,19,20], dan perilaku oksidasi [2,4,7,24]. Namun, hanya sedikit penelitian yang mendalam dan sistematis mengenai karakteristik Al- MoSi_2 komposit dengan variasi temperatur yang berbeda. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari perilaku oksidasi pada lapisan komposit Al- MoSi_2 yang dideposisikan di atas permukaan baja karbon rendah.

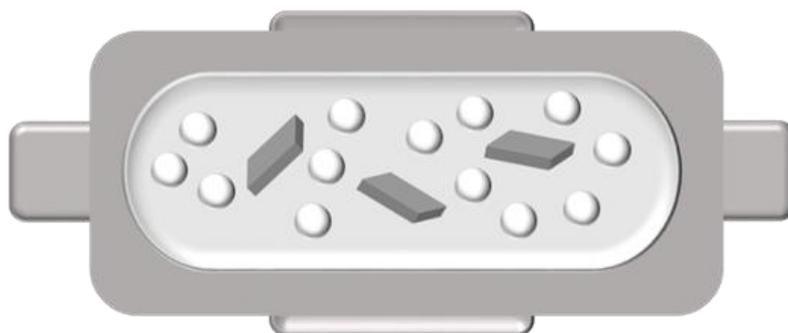
2. Material dan metode penelitian

2.1 Proses deposisi lapisan Al- MoSi_2

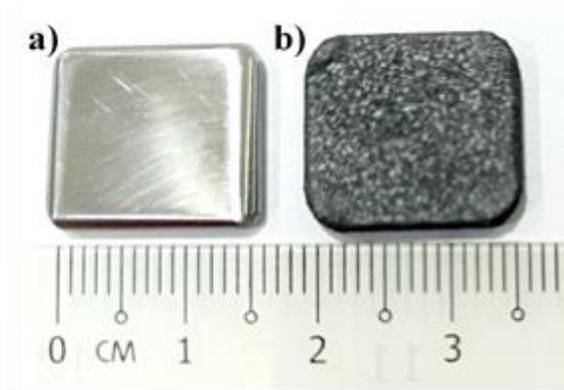
Pelat baja karbon rendah yang digunakan sebagai substrat memiliki dimensi panjang, lebar dan tebal secara berurutan yaitu 15, 15, dan 1,5 mm. Proses pertama adalah membersihkan permukaan substrat baja karbon rendah menggunakan teknik polish dengan kertas polish hingga grade 800, lalu substrat baja karbon rendah dibersihkan melalui ultrasonic dengan menggunakan aseton teknik [20]. Sebelum melakukan paduan mekanis, bahan MoSi_2 perlu dihaluskan dulu menjadi bubuk menggunakan mesin *shaker mill* selama 60 menit. Kemudian bubuk MoSi_2 disaring dengan ukuran 325 mesh atau setara dengan partikel ukuran 44 μm . Sedangkan bubuk aluminium dengan kemurnian tinggi digunakan untuk pengikat pada proses lapisan dengan metode paduan mekanis menggunakan alat *home made shaker mill*. Serbuk Al dan MoSi_2 ditimbang dengan komposisi seperti yang disajikan pada Tabel 1. Selanjutnya, kedua serbuk tersebut dimasukkan pada botol baja *stainless steel* dengan bola-bola *stainless steel* (SS). Bola SS yang digunakan memiliki diameter 5 mm dengan jumlah 10 kali berat dari serbuk. Serbuk campuran dimixing selama 1 jam untuk mendapatkan campuran serbuk yang terdistribusi seragam. Proses pelapisan dengan teknik paduan mekanis dilakukan selama 4 jam, dimana prosesnya diilustrasikan pada Gambar 1. Hasil proses pelapisan karbon baja rendah dan substrat sebelum dilapisi ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Komposisi unsur bahan pelapis

Bahan	Elemen	Fungsi	Berat (%)
Alumunium	Al	Pengikat	30
Molibdenum disilisida	MoSi_2	Lapisan utama	70



Gambar 1. Ilustrasi skema persiapan pelapisan menggunakan teknik paduan mekanis.



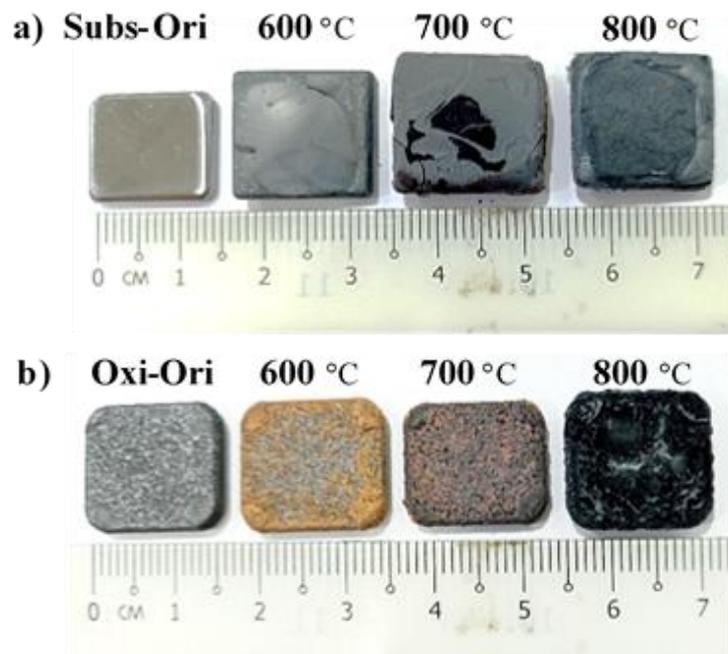
Gambar 2. Gambar substrat (a) sebelum dan (b) setelah proses pelapisan

2.2 Uji oksidasi siklik

Perilaku oksidasi lapisan komposit Al-MoSi₂ diuji dengan percobaan oksidasi siklik. Sebelum uji oksidasi siklik, dimensi sampel diukur secara teliti dengan jangka sorong digital. Percobaan oksidasi siklik dilakukan dalam tungku muffle dengan suhu yang bervariasi yaitu 600, 700, dan 800 °C di dalam lingkungan udara, dimana sampel diberikan kode penulisan sesuai pada Tabel 2. Detail langkah-langkah uji oksidasi siklik dijelaskan pada pekerjaan sebelumnya [1]. Sampel dimasukkan ke dalam tungku dengan suhu tinggi selama 20 jam, kemudian dikeluarkan untuk pendinginan. Pertambahan berat sampel diukur tiga kali menggunakan timbangan elektronik dengan ketelitian 0,01 mg dan hasilnya dirata-rata. Proses ini diulangi hingga 5 siklus dan total waktu oksidasi adalah 100 jam selama oksidasi siklik.

Tabel 2. Nama sampel pengujian oksidasi

Nama sampel	Komposisi pelapisan	Temperatur Oksidasi (°C)
<i>Oxi-600</i>	30 Al-70 MoSi ₂	600
<i>Oxi-700</i>	30 Al-70 MoSi ₂	700
<i>Oxi-800</i>	30 Al-70 MoSi ₂	800
Subs-600	-	600
Subs-700	-	700
Subs-800	-	800

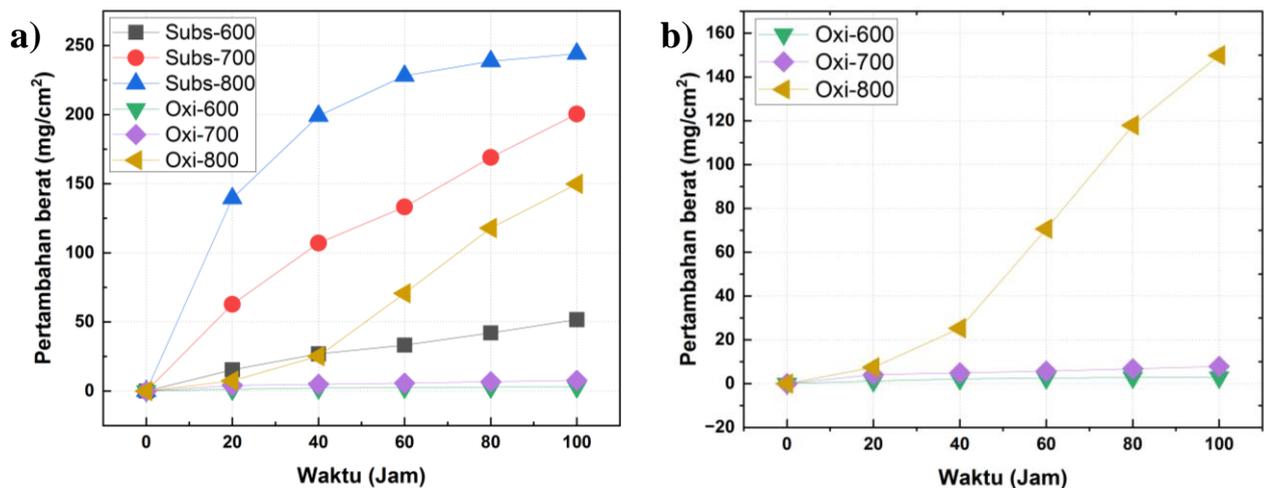


Gambar 3. permukaan teroksidasi a) substrat ,b) Al-MoSi₂

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3. menunjukkan mikrograf dari substrat dan lapisan Al-MoSi₂ sebelum dan sesudah oksidasi siklik selama 100 jam. Pada Gambar 3(a) jelas terlihat bahwa substrat baja karbon rendah memiliki ketahanan oksidasi yang tidak baik. Hal ini dapat dilihat dari perubahan dimensi dan warna-nya, dimensi substrat setelah oksidasi bertambah dengan meningkatnya suhu oksidasi. Meningkatnya suhu oksidasi menyebabkan peningkatan reaksi antara Fe dengan oksigen membentuk oksida yang tidak memiliki sifat melindungi sehingga pertumbuhan oksida terus berjalan dengan bertambahnya waktu. Mikrograf dari lapisan Al-MoSi₂ sesudah oksidasi menunjukkan perubahan warna, namun tidak menunjukkan perubahan ukuran ketika suhu oksidasi 600 dan 700 °C, namun lapisan berubah menjadi hitam dan bertambah dimensinya pada suhu oksidasi 800 °C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa lapisan komposisi Al-MoSi₂ pada baja rendah karbon memiliki ketahanan oksidasi yang baik pada suhu 600 dan 700 °C dibandingkan dengan baja karbon rendah. Berdasarkan mikrograf dari substrat dan lapisan Al-MoSi₂ dapat disimpulkan bahwa lapisan komposit Al-MoSi₂ memiliki ketahanan oksidasi yang baik pada suhu 600 dan 700 °C.

Perilaku oksidasi lapisan komposit Al-MoSi₂ setelah oksidasi pada suhu 600, 700, dan 800 °C selama 100 jam dipelajari dari kurva kinetika pertambahan berat yang ditunjukkan pada Gambar 4. Pada gambar 4(a) ditunjukkan bahwa pertambahan berat pada baja karbon rendah secara umum lebih tinggi dibanding dengan baja karbon rendah yang dilapisi komposit Al-MoSi₂. Pertambahan berat pada baja karbon rendah linier dengan bertambahnya suhu oksidasi. Hasil ini mendukung dari data mikrograf yang pada Gambar 3. Berbeda dengan baja karbon rendah yang dilapisi komposit Al-MoSi₂, dimana pertambahan berat jauh lebih kecil dibanding tanpa lapisan. Detail kurva kinetika pertambahan berat untuk lapisan komposit Al-MoSi₂ ditunjukkan pada Gambar 4(b). Lapisan komposit Al-MoSi₂ memiliki pertambahan berat yang sangat rendah. Hal tersebut menegaskan bahwa MoSi₂ memiliki ketahanan oksidasi yang lebih baik dibandingkan dengan baja karbon rendah. Bagaimanapun, hasil yang berbeda ditunjukkan pada lapisan komposit yang dioksidasi pada suhu 800 °C, dimana pertambahan massa yang signifikan terjadi pada siklus yang ketiga. Hasil tersebut menguatkan bahwa lapisan komposit Al-MoSi₂ tidak memiliki ketahanan oksidasi yang bagus ketika suhu oksidasi 800 °C.



Gambar 4. Kinetika pertambahan berat per satuan luas terhadap waktu, a) semua sampel, b) sampel coating

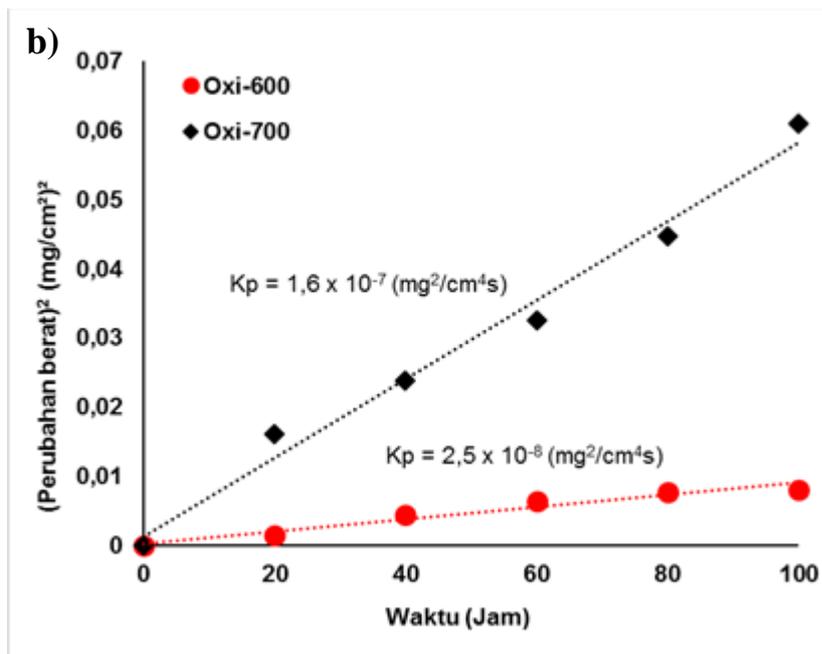
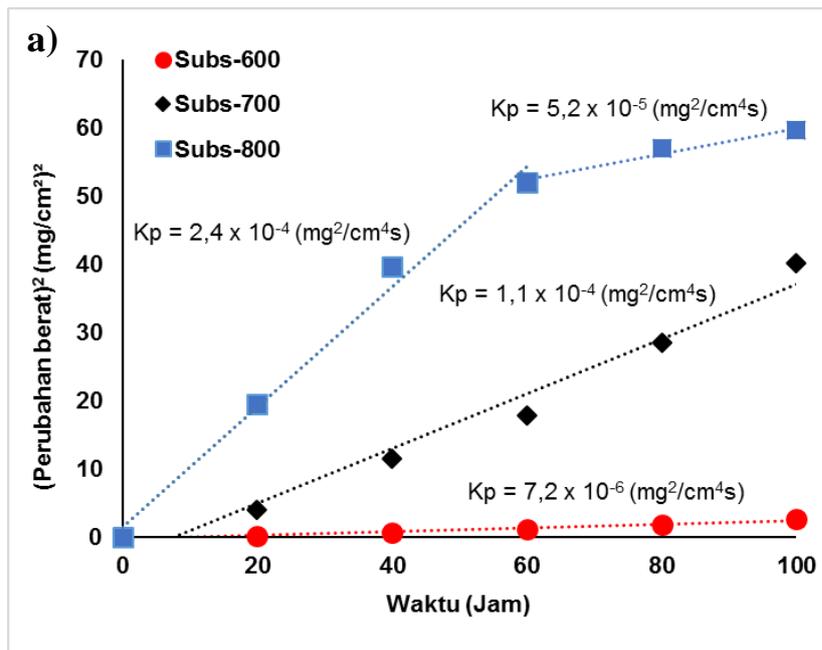
Dalam oksidasi siklik, penambahan berat disebabkan oleh keretakan dan pengeroposan skala oksida, dan intensitas fenomena ini meningkatkan oksidasi, sehingga meningkatkan berat. Pertambahan berat meningkat secara bertahap seiring bertambahnya jumlah siklus. Dengan bertambahnya ketebalan lapisan oksidasi maka menjadikan nilai laju parabola juga meningkat. Nilai konstanta laju parabola (K_p), yang didasarkan pada persamaan laju parabola untuk proses oksidasi suhu tinggi ditunjukkan pada persamaan (1) [4].

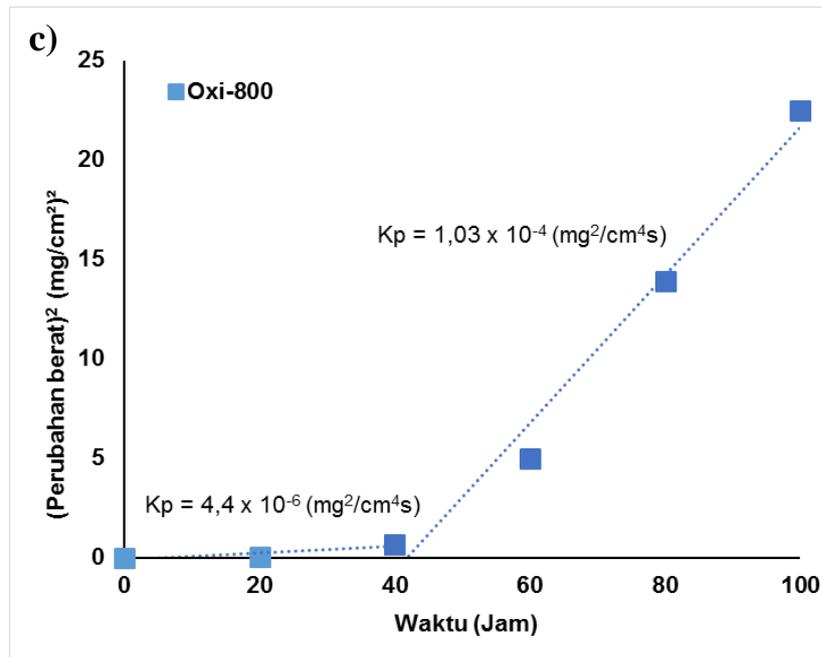
$$X^2 = K_p t \quad (1)$$

Dimana X adalah perubahan berat per satuan luas permukaan, t menunjukkan waktu dan K_p adalah konstanta laju pertumbuhan parabola [21]. Laju oksidasi yang mengikuti laju parabola (K_p) berarti kerak oksida melekat dengan baik pada lapisan substrat [25,26]. Dapat dipahami bahwa ketahanan oksidasi Al-MoSi₂ yang sangat baik disebabkan oleh rendahnya laju oksidasi. Gambar 5(a) menunjukkan konstanta laju parabola pada substrat baja karbon rendah, pada saat pengujian oksidasi 800 °C nilai K_p subs-800 pada 60 jam pertama sebesar $2,4 \times 10^{-4}$ kemudian mengalami penurunan sebesar $5,2 \times 10^{-5}$ pada jam ke 60 sampai ke 100 jam. Gambar 5(b) menunjukkan bahwa nilai konstanta laju parabola lapisan komposit Al-MoSi₂ lebih rendah dibandingkan dengan substrat. Konstanta laju parabola untuk substrat dan lapisan komposit Al-MoSi₂ pada suhu yang diteliti dapat dilihat dalam Tabel 3. Gambar 5(c) nilai konstanta laju parabola lapisan komposit Al-MoSi₂ nilai K_p Oxi-800 pada 40 jam pertama sebesar $4,4 \times 10^{-6}$ kemudian mengalami kenaikan yang signifikan sebesar $1,03 \times 10^{-4}$ pada jam ke 40 sampai ke 100 jam. Hasil tersebut menguatkan bahwa lapisan komposit Al-MoSi₂ tidak memiliki ketahanan oksidasi yang bagus ketika suhu oksidasi 800 °C.

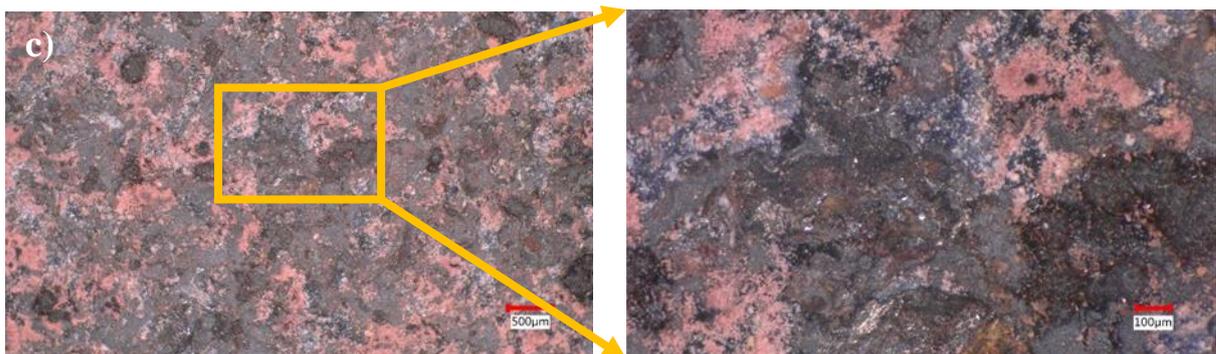
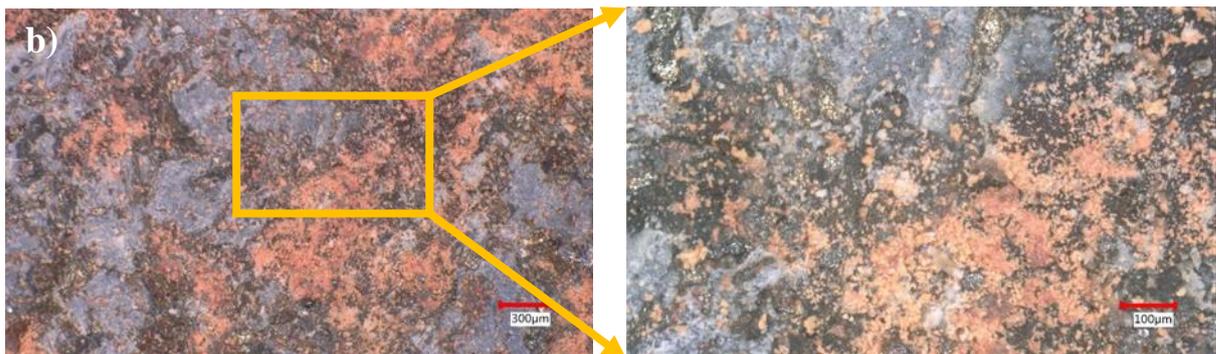
Tabel 3. Konstanta laju parabola

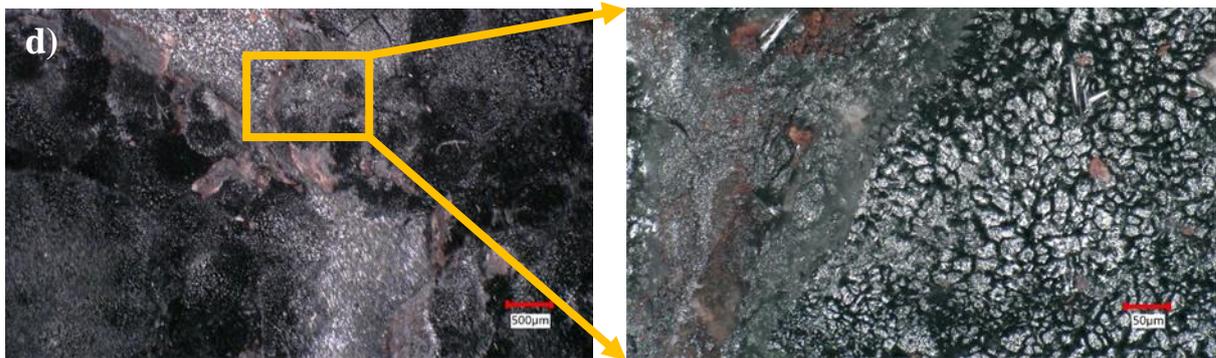
Sampel	Waktu (Jam)	Kp	R ²
Subs-600	0-100	$7,2 \times 10^{-6}$	0,9586
Subs-700	0-100	$1,1 \times 10^{-4}$	0,9714
Subs-800	0-60	$2,4 \times 10^{-4}$	0,9898
Subs-800	60-100	$5,2 \times 10^{-5}$	0,9717
Oxi-600	0-100	$2,5 \times 10^{-8}$	0,951
Oxi-700	0-100	$1,6 \times 10^{-7}$	0,9853
Oxi-800	0-40	$4,4 \times 10^{-6}$	0,8142
Oxi-800	40-100	$1,03 \times 10^{-4}$	0,9801



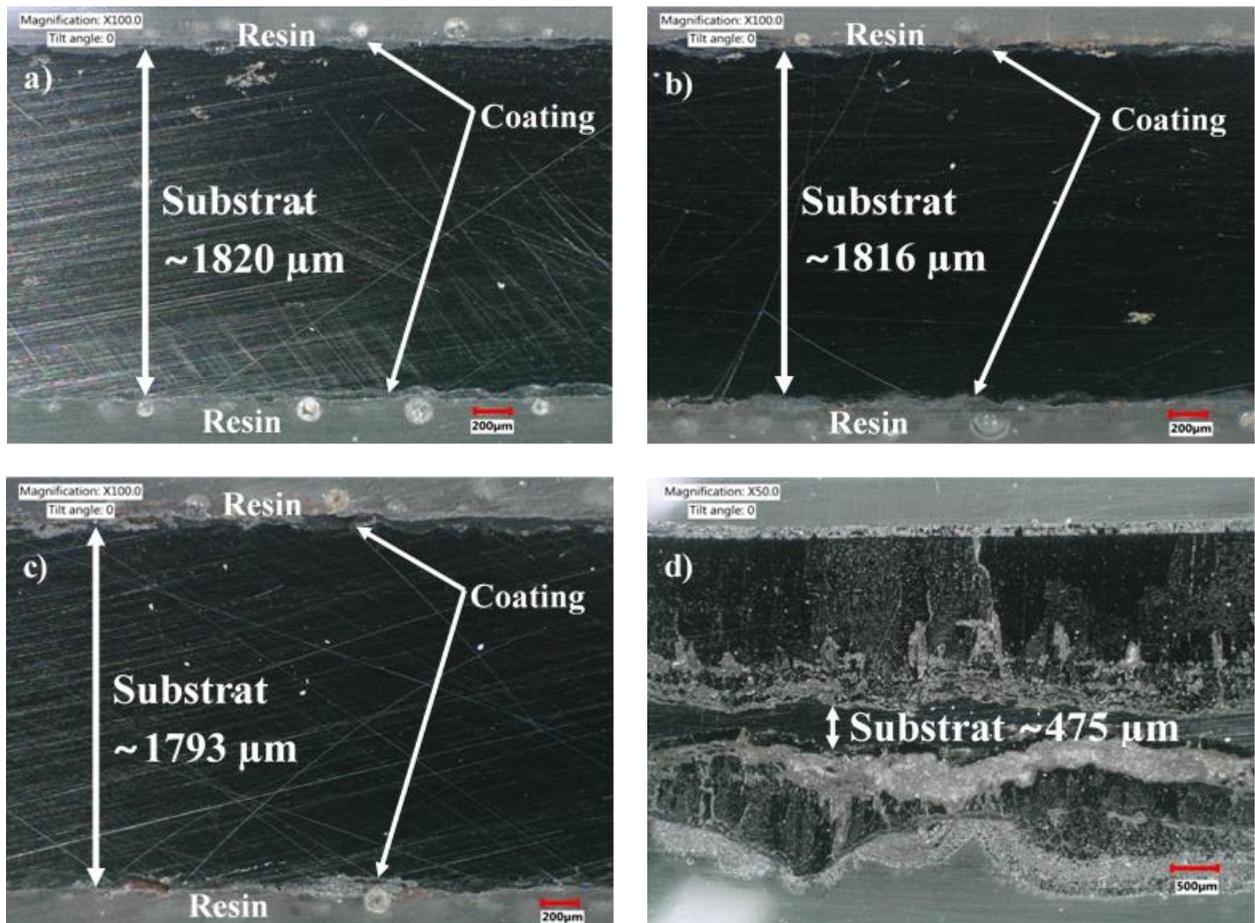


Gambar 5. Perubahan berat² sebagai laju oksidasi dari substrat dan pelapis, a) perubahan berat² substrate, b) perubahan berat² Oxi-600; Oxi-700, c) perubahan berat² Oxi-800.





Gambar 6. Mikrografi Al-MoSi₂ permukaan pelapis komposit, a)sebelum pengujian, b)Oxi-600, c)Oxi-700, d)Oxi-800.



Gambar 7. Gambar penampang *Optical Microscop* lapisan komposit Al-MoSi₂, a)sebelum pengujian, b)Oxi-600, c)Oxi-700, d)Oxi-800

Gambar 6. menyajikan gambar mikroskopi dari lapisan komposit Al-MoSi₂ sebelum dan setelah teroksidasi selama 100 jam. Terjadi perubahan warna pada setiap variasi temperatur dikarenakan pembentukan fase baru yang sifatnya protektif. Gambar 6(a) memperlihatkan lapisan komposit Al-MoSi₂ yang belum dilakukan pengujian oksidasi. Terlihat substrat baja karbon rendah tertutupi sempurna oleh lapisan komposit Al-MoSi₂. Gambar 6(b) memperlihatkan permukaan lapisan komposit Al-MoSi₂ yang teroksidasi pada temperatur 600 °C, terlihat ketahanan MoSi₂ pada lapisan yang bisa menahan oksidasi yang baik. Walaupun penyebaran Al tidak begitu sempurna namun pada suhu 600 °C Al masih efektif untuk merekatkan lapisan pada substrat. Gambar 6(c) menunjukkan bagian permukaan lapisan komposit Al-MoSi₂ yang teroksidasi pada temperatur 700 °C, terdapat beberapa titik yang berwarna sedikit gelap dan ketika diperbesar akan membentuk lubang (cekungan), hal itu disebabkan karena Al mengalami difusi antar lapisan ketika terkena suhu tinggi [3]. Sementara itu, ketika suhu oksidasi lebih tinggi dari 750 °C, pembentukan MoO yang cepat akan menyebabkan pemuai volume yang serius dan penguapan oksidasi, dan pelepasan tegangan internal akan menyebabkan pelepasan atau bahkan disintegrasi bahan substrat [19]. Gambar 6(d) menunjukkan bahwa lapisan komposit Oxi-800 mengalami kerusakan yang begitu parah pada pelapisannya, dan menyebabkan substrat menjadi teroksidasi dan munculnya bintik oksida. Terjadi perubahan warna dari abu abu kecolatan menjadi berwarna hitam

dikarenakan Fe teroksidasi. Hal ini menjadikan kegagalan pelapisan selama oksidasi [25]. Perbesaran dari permukaan Oxi-800 terlihat pecah dan hilangnya pelapisan Al-MoSi₂ sehingga menyebabkan substrat tidak terlapis dan terkena oksidasi secara langsung. Dapat diketahui bahwa distribusi partikel penguat dalam matriks tidak homogen berdampak negatif terhadap sifat mekanik komposit [27,28].

Gambar 7. menampilkan gambar OM dari penampang lapisan komposit Al-MoSi₂ sebelum dan sesudah pengujian oksidasi siklik. Ketebalan rata-rata substrat yang dilapisi Al-MoSi₂ sebelum dilakukan pengujian dan setelah dilakukan pengujian oksidasi siklik suhu 600, 700, dan 800 °C masing-masing sekitar 1,8 mm; 1,8 mm; 1,7 mm; dan 0,4 mm. Sampel substrat baja karbon rendah yang dilapisi pelapis komposit tidak mengalami perubahan pada warna, bentuk, maupun massanya setelah dilakukan pengujian oksidasi siklik suhu 600, 700 °C. Hal itu menandakan bahwa pelapis komposit berhasil melapisi substrat baja karbon rendah dengan sempurna. Namun, terjadi perbedaan struktur pada Oxi-800. Gambar 7(d) menunjukkan ketebalan substrat hanya sekitar 475 µm, berkurangnya ketebalan substrat disebabkan oleh retaknya lapisan komposit yang melapisi substrat baja karbon rendah sehingga menyebabkan munculnya pori-pori pada permukaan lapisan yang membuat substrat tidak terlapis lagi. Pori pori tersebut menyebabkan difusi oksigen bersuhu tinggi bereaksi langsung mengenai substrat dan membentuk oksida. Pembentukan oksida tersebut menghasilkan lapisan baru pada permukaan pelapis komposit. Hal itu menjadikan substrat yang dilapisi pelapis komposit berubah bentuk, berat serta warnanya.

4. Kesimpulan

Dalam penelitian ini, Al-MoSi₂ pelapisan komposit diaplikasikan pada baja karbon rendah menggunakan teknik paduan mekanik. Perilaku oksidasi dengan variasi temperatur yang telah dipelajari. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa:

- Baja karbon rendah yang dilapisi lapisan komposit 30Al-70MoSi₂ menggunakan teknik paduan mekanik dapat terlapis dengan sempurna, hal itu menunjukkan lapisan tersebut memiliki struktur komposit yang baik.
- Kurva kinetik lapisan komposit Al-MoSi₂ setelah oksidasi siklik selama 100 jam dengan suhu 600, 700, 800 °C mengikuti hukum parabola. Namun pada suhu 800 °C lapisan komposit menghasilkan dua konstanta laju oksidasi. Kp laju oksidasi lapisan komposit Oxi-800 pada jam 0-40 sebesar $4,4 \times 10^{-6}$, dan terjadi peningkatan secara signifikan pada jam ke 40-100 sebesar $1,03 \times 10^{-4}$.
- Setelah oksidasi, tidak ada daerah berpori dan retak yang terlihat pada lapisan pelapis komposit. Partikel abu-abu kecil dan besar saling terhubung meskipun terjadi perbedaan warna pada permukaan lapisan komposit antara Oxi-600 dan Oxi-700. Namun berbeda dengan Oxi-800 yang mengalami keretakan pada lapisan komposit sehingga membentuk celah yang menyebabkan difusi oksigen langsung terkena pada substrat. Hal itu menyebabkan perubahan warna, berat dan bentuk.
- Lapisan komposit Al-MoSi₂ melekat sempurna pada substrat baja karbon rendah. Skala oksida pada permukaan pelapis tersebar merata, padat, dan melekat pada permukaan sampel serta efektif melindungi lapisan komposit dari oksidasi pada suhu tinggi, kecuali suhu 800 °C keatas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah menyediakan fasilitas penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] D. Aryanto *et al.*, "Microstructure and oxidation resistance of Al 50 (Fe – Cr) (50- x) (SiC) x composite coated low-carbon steel prepared by mechanical milling," vol. 297, no. January, 2023.
- [2] D. Aryanto *et al.*, "Microstructure and oxidation behavior of an Al – Ni – Cr – Cu – MoO 3 – SiO 2 composite coating on low-carbon steel," vol. 261, no. October 2020, 2021.
- [3] D. Aryanto and T. Sudiro, "Surface & Coatings Technology Preparation of ferrosilicon-aluminium coating using a mechanical alloying technique : Study of thermal annealing on their structural characteristics," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 337, no. December 2017, pp. 35–43, 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.12.041.
- [4] D. Aryanto, T. Sudiro, A. Sukarto, W. Bambang, P. Sebayang, and N. Tau, "Effect of annealing temperature on the oxidation behavior of ferrosilicon-aluminum-coated low carbon steel by mechanical alloying," vol. 821, 2020.
- [5] D. Aryanto *et al.*, "Two steps CrAlFeSi coating on low carbon steel prepared by mechanical alloying and its oxidation properties," vol. 92, pp. 1–19, 2020, doi: 10.1590/0001-3765202020200524.
- [6] Z. Liu, W. Li, J. Fan, Y. Lv, Z. Wang, and X. Zhao, "High temperature oxidation behavior of MoSi 2 – Al 2 O 3 composite coating on TZM alloy," *Ceram. Int.*, vol. 48, no. 8, pp. 10911–10920, 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.12.310.
- [7] L. Liu, H. Q. Zhang, H. Lei, H. Q. Li, J. Gong, and C. Sun, "In fl uence of di ff erent coating structures on the oxidation resistance of MoSi 2 coatings," vol. 46, no. November 2019, pp. 5993–5997, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.11.055.
- [8] L. Li, X. Guo, and Y. Qiao, "Journal of Alloys and Compounds," vol. 938, 2023.

- [9] L. Zhu *et al.*, “Fabrication of MoSi₂ coatings on molybdenum and its high-temperature anti-oxidation properties,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 32, no. 3, pp. 935–946, 2022, doi: 10.1016/S1003-6326(22)65844-8.
- [10] L. Zhu *et al.*, “Preparation and 1500 °C oxidation behavior of crack-free bentonite doped MoSi₂ protective coating on molybdenum,” vol. 184, no. November 2020, 2021.
- [11] G. Zhang, J. Sun, and Q. Fu, “Surface & Coatings Technology Microstructure and oxidation behavior of plasma sprayed WSi₂-mullite- MoSi₂ coating on niobium alloy at 1500 °C,” vol. 400, no. July, pp. 2–11, 2020.
- [12] X. Wang, T. Yang, Q. Li, P. Yan, and S. Wang, “Journal of the European Ceramic Society Comparative study of failure mechanisms of MoSi₂ coating on Mo1 wire mesh under isothermal oxidation and hot-fire test using a hydroxylammonium nitrate based monopropellant,” vol. 41, no. December 2020, pp. 2415–2424, 2021.
- [13] E. Szajna, G. Moskal, W. Stryczniewicz, A. Koz, K. Le, and M. Miku, “Surface & Coatings Technology Microstructure and high-temperature oxidation behaviour of MoSi₂ protective coatings on Mo-based combustion chamber in rocket engines,” vol. 473, no. April, 2023.
- [14] L. Xiao, X. Xu, S. Liu, Z. Shen, S. Huang, and W. Liu, “Journal of the European Ceramic Society Oxidation behaviour and microstructure of a dense MoSi₂ ceramic coating on Ta substrate prepared using a novel two-step process,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 40, no. 10, pp. 3555–3561, 2020, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.064.
- [15] J. Huang and G. Zhang, “Microstructures and performances of pressureless sintered,” vol. 224, no. September, 2023.
- [16] T. Permukaan and T. Permukaan, “Pengaruh cerium terhadap struktur mikro dan kinerja anti korosi Lapisan Al-Zn,” vol. 473, no. 3, 2023.
- [17] T. Permukaan *et al.*, “Machine Translated by Google Perilaku oksidasi lapisan komposit Cr-AlSi₁₂ pada substrat paduan Ti-6Al-4V yang dibuat melalui metode paduan mekanis energi tinggi Machine Translated by Google,” vol. 367, pp. 212–224, 2019.
- [18] H. Sun *et al.*, “Surface & Coatings Technology Effects of Ni-5 wt % Al / Bi₂O₃ addition and heat treatment on mechanical and tribological properties of atmospheric plasma sprayed Al₂O₃ coating,” vol. 472, no. June, 2023.
- [19] A. Isnaini, “Mechanical Alloying,” pp. 17–31.
- [20] A. H. Awad, H. A. Aly, and M. Saood, “Physical , mechanical , and corrosion properties of Ti – 12Mo and Ti – 15Mo alloys fabricated by elemental blend and mechanical alloying techniques,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 312, no. September 2023, p. 128661, 2024, doi: 10.1016/j.matchemphys.2023.128661.
- [21] M. Niinomi, “Recent Metallic Materials for Biomedical Applications,” vol. 33, no. MARCH, 2002.
- [22] J. Jiang, Y. Shen, and X. Feng, “Microstructures evolution , formation mechanisms and properties of Sic p / Al composite coatings on Ti-6Al-4v substrate via mechanical alloying method,” vol. 19, no. December 2019, 2020.
- [23] J. Jiang, X. Feng, Y. Shen, C. Lu, and Y. Tian, “Surface & Coatings Technology Oxidation behavior of Cr-AlSi₁₂ composite coatings on Ti-6Al-4V alloy substrate fabricated via high-energy mechanical alloying method,” vol. 367, no. March, pp. 212–224, 2019.
- [24] T. Fu, Y. Zhang, F. Shen, K. Cui, and L. Chen, “Materials Characterization Microstructure and oxidation behavior of Si-MoSi₂ coating deposited on Mo substrate at 600 °C and 900 °C in static air,” *Mater. Charact.*, vol. 192, no. July, p. 112192, 2022, doi: 10.1016/j.matchar.2022.112192.
- [25] B. Co, S. Ramandhany, D. Triyono, and E. Sugiarti, “Hot Corrosion Performance of HVOF NiCr - Based Coatings,” *High Temp. Corros. Mater.*, no. 95, 2023, doi: 10.1007/s11085-023-10208-9.
- [26] E. Sadeghimeresht, L. Reddy, T. Hussain, M. Huhtakangas, N. Markocsan, and S. Joshi, “In fl uence of KCl and HCl on high temperature corrosion of HVAF-sprayed NiCrAlY and NiCrMo coatings,” vol. 148, pp. 17–29, 2018.
- [27] A.- Si- and M. L. Öveçog, “Characterization of mechanically alloyed and pressureless sintered,” vol. 30, pp. 2626–2635, 2019, doi: 10.1016/j.appt.2019.08.010.
- [28] D. Ag, S. Mertdinç, A. H. Paksoy, and M. L. Öveçog, “Microstructural characterizations and mechanical properties of NbB₂ and VB particulate-reinforced eutectic Al-12 . 6 wt % Si composites via powder metallurgy method,” vol. 29, pp. 2070–2081, 2018, doi: 10.1016/j.appt.2018.05.013.